

VESI- JA YMPÄRISTÖHALLITUKSEN MONISTESARJA

Nro 376

JÄRVIEŒ ELIÖSTÖN, LÄHINNÄ KALOJEN
KOHONNEET ELOHOPEAPITOISUUDET SEKÄ
PITOISUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kirjallisuuskatsaus

Pertti Manninen

V E S I - J A Y M P Ä R I S T Ö H A L L I T U K S E N
M O N I S T E S A R J A

Nro 376

JÄRVIEN ELIÖSTÖN, LÄHINNÄ KALOJEN
KOHONNEET ELOHOPEAPITOISUUDET SEKÄ
PITOISUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kirjallisuuskatsaus

Pertti Manninen

Vesi- ja ympäristöhallitus
Helsinki 1992

Tekijä on vastuussa julkaisun sisällöstä, eikä siihen voida vedota vesi- ja ympäristöhallituksen virallisena kannanottona.

Julkaisua saa Mikkelin vesi- ja ympäristöpiiristä.

ISBN 951-47-5579-0
ISSN 0783-3288

Painopaikka: Vesi- ja ympäristöhallituksen monistamo,
Helsinki 1992

KUVAILULEHTI

Julkaisija

Vesi- ja ympäristöhallitus

Julkaisun päivämäärä

5.2.1992

Tekijä(t) (toimielimestä: nimi, puheenjohtaja, sihteeri)

Pertti Manninen

Julkaisun nimi (myös ruotsinkielinen)

Järvien eliöstön, lähinnä kalojen kohonneet elohopeapitoisuudet sekä pitoisuuksiin vaikuttavat tekijät
Kirjallisuuskatsaus

Julkaisun lajiToimeksiantajaToimielimen asettamispyvmJulkaisun osatTiivistelmä

Julkaisu on kirjallisuuskatsaus ja käsittelee elohopean esiintymistä luonnossa, lähinnä suomalaisten ja ruotsalaisten järvien kaloissa sekä kohonneisiin elohopeapitoisuuksiin vaikuttavia tekijöitä.

Edelleen käsitellään elohopean esiintymistä ja kulkeutumisdynamiikkaa lähinnä kalaston kannalta sekä elohopeaongelman tulevaisuutta.

Asiasanat (avainsanat)

elohopea, kalat, laskeuma, päästöt

Muut tiedotSarjan nimi ja numero

Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja nro 376

ISBN

951-47-5579-0

ISSN

0783-3288

Kokonaissivumäärä

25

Kieli

suomi

HintaLuottamuksellisuus

julkinen

Jakaja

Mikkelin vesi- ja ympäristöpiiri
PL 77, 50101 MIKKELI

Kustantaja

Vesi- ja ympäristöhallitus
PL 250, 00101 HELSINKI

S I S Ä L L Y S

	Sivu
1 JOHDANTO.....	5
2 ELOHOPEAN ESIINTYMINEN LUONNOSSA.....	5
3 JÄRVEEN TULEVA ELOHOPEA JA SEN KONSENTROITUMINEN KALOIHIIN.....	6
4 KALOJEN ELOHOPEAPITOISUUDET SUOMESSA JA RUOTSISSA.....	7
5 METSÄJÄRVIER ELOHOPEAPITOISUUS.....	8
6 SUOMEN TEKOJÄRVIER KALOJEN ELOHOPEAPITOISUUS.....	10
7 ELOHOPEAN KOHONNEISIIN PITOISUUKSIIN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ.....	11
7.1 Happamoituminen.....	11
7.2 Elohopean esiintyminen ilmakehässä ja laskeumaan mahdollisesti vaikuttavista tekijöistä.....	12
7.2.1 Suomen elohopealaskumat.....	13
7.2.2 Ruotsin elohopealaskumat.....	14
7.2.3 Kaukokulkeutuminen.....	14
7.3 Humuksen vaikutukset maaperän elohopealaskumaan.....	15
7.4 Elohopean kulkeutuminen maalta veteen.....	16
7.5 Valuma-alueella suoritettujen toimen- piteiden vaikutukset kalojen elohopea- pitoisuuteen.....	17
8 SUOMEN ELOHOPEAPÄÄSTÖT.....	17
9 ELOHOPEAONGELMAN TULEVAISUUS.....	19
9.1 Päästöjen vähentäminen.....	19
9.2 Kalojen elohopeapitoisuuden vähentäminen itse järveen kohdistuvilla toimenpiteillä.....	20
LÄHDELUETTELO.....	21
LIITE Mikkelin vesi- ja ympäristöpiirin kokoamia tietoja kalojen elohopea- pitoisuuksista Mikkelin läänin järvissä v. 1968-85.....	23

1 J O H D A N T O

1970-luvulla on useissa tutkimuksissa havaittu kohon-
neita elohopeapitoisuuksia sekä teko- että luonnonjär-
vien kaloissa. Näiden havaintojen pohjalta käynnisty-
ivät elohopeatutkimukset mm. USA:ssa, Kanadassa ja
Ruotsissa.

Suomessa tutkimukset käynnistyivät 1970-luvun alussa
ensin tekojärvillä, joissa oli havaittu kohonneita
elohopeapitoisuuksia. 1970- ja 1980-lukujen vaihteessa
todettiin meillä huomattavan korkeita elohopeapitoi-
suuksia uudempien tekojärvien kaloissa. Tekojärvien
kalojen yleinen elohopeataso oli myös selvästi luon-
nonjärviä korkeampi. Myös tekojärvien kalaa runsaasti
syövien ihmisten hiuksissa todettiin kohonneita eloho-
peapitoisuuksia.

Näiden tutkimusten perusteella määritettiin 10 tekoal-
taan kala ihmisravinnoksi kelpaamattomaksi ja 7 teko-
järven kalojen käyttöä rajoitettiin.

1980-luvun alussa havaittiin myös useiden ruskeiden
(humuspitoisten) luonnonjärvien kaloissa korkeita
elohopeapitoisuuksia. Nämä havainnot johtivat Suomessa
vesihallinnon tieteellisen neuvottelukunnan aloittees-
ta elohopeaongelmaa käsitteleviin tutkimusprojektei-
hin. Näiden tarkoituksena oli selvittää ilmasta ja
maaperästä vesistöihin kohdistuvan elohopeakuormituk-
sen suuruutta ja elohopean metyloitumiseen ja rikastu-
miseen vaikuttavia tekijöitä. Huomiota kiinnitettiin
myös kalaelohopeapitoisuuden ennustamisen menetelmiin
sekä mahdollisiin elohopeapitoisuuden alentamismahdol-
lisuuksiin. Erityistä huomiota kiinnitettiin myös
maa- ja vesirakentamisen vaikutuksiin.

2 E L O H O P E A N E S I I N T Y M I N E N
L U O N N O S S A

Elohopea esiintyy luonnossa monimuotoisena. Yleisimmät
ja elohopean liikkumisen kannalta tärkeimmät esiinty-
mismuodot ovat partikkelimaiseen aineeseen sitoutuneet
muodot sekä liuenneet orgaaniset kompleksit. Liuennut
epäorgaaninen elohopea esiintyy hapekkaissa vesissä
pääasiallisesti hydrokseina ja klorideina. Pelkisty-
neissä oloissa voi esiintyä metallista elohopeaa ja
rikin läsnäollessa sulfidi- ja vetysulfidikomplekseja.
Liunneen orgaanisen elohopean vallitsevia muotoja
luonnonvesissä ovat metyylielohopeakloridi ja -hydrok-
sidi. Pääosa vesistöjen kokonaiselohopeasta (yli 99 %)
on kuitenkin epäorgaanisessa muodossa sitoutuneena
pohjasedimenttiin. Metyylielohopean osuus on alle 1 %
(Kokko & Turunen 1988).

3 JÄRVEEN TULEVA ELOHOPEA JA SEN KONSENTROITUMINEN KALOIHIN

Järviin tulevan elohopean määrä ei sinällään ole kovin suuri. Esim. ruotsalaisen arvion mukaan joutuu noin 1 km²:n suuruiseen järveen vuodessa karkeasti arvioiden n. 50 g elohopeaa. Syy, miksi tätä kokoluokkaa oleva määrä aiheuttaa suuren ongelman, johtuu elohopean metyylioitumisesta erittäin myrkylliseksi metyylielohopeaksi. Metyloitumista tapahtuu mikro-organismien myötävaikutuksella maan pintakerroksissa, vedessä ja järvien sedimentissä. Muuttuminen voi tapahtua myös puhtaiden kemiallisten reaktioiden avulla orgaanisen materiaalin läsnäollessa.

Metyylielohopea kulkeutuu helposti organismeihin, koska se kykenee läpäisemään biologisia membraaneja ja sitoutuu organismien proteiineihin. Sekä elohopean määrä että metyylielohopean osuus kasvavat ravintoketjussa planktonista kalaan. Petokalojen pitoisuudet ovat ruotsalaisissa tutkimuksissa olleet eläinplanktoniin nähden n. 25-kertaisia. Eläinplanktonin metyylielohopeapitoisuudet ovat olleet noin 50 % kokonaiselohopeamäärästä, kun petokalojen metyylielohopean osuus on ollut yli 90 %. Metyylielohopean määrä kalassa kasvaa koko elinajan sen rikastumisominaisuuksista johtuen. Metyylielohopean biologinen puoliintumisaika hauilla on arvioitu noin kahdeksi vuodeksi (Johansson et al 1988, Iverfeldt & Johansson 1988).

Elohopean on havaittu konsentroituvan hauen ja kirjo-lohen lihaskudokseen suoraan syödyistä ravinnosta. Elohopean keräytyminen on riippuvainen mm. kalalajista, ruokailutottumuksista, aineenvaihdunnan nopeudesta, iästä ja koosta, veden laadusta ja tietysti veden elohopean määrästä ja laadusta. Yleisesti vesieliöiden elohopean konsentroitumiskertoimet vaihtelevat n. 1000:sta yli 5000:een mm. trofiatasosta ja lajista riippuen.

Metyylielohopean on havaittu poistuvan kaloista alussa nopeasti, jona aikana elohopea hajautuu elimistöön. Tämä vaihe kestää vain muutamia viikkoja. Toisessa vaiheessa poistuminen elimistöstä on hidasta ja puoliintumisaika on arvioitu tällöin olevan noin 2 vuotta.

Kalojen ja todennäköisesti myös muiden alempien selkärankaisten metyylielohopea poistuu elimistöstä huomattavasti hitaammin kuin korkeammilla maaselkärankaisilla. Esim. ihmisen metyylielohopean biologinen puoliintumisaika on vain noin 80 päivää (EPA 1973).

4 KALOJEN ELOHOPEAPITOISUUDET SUOMESSA JA RUOTSISSA

Elohopean haitalliset vaikutukset ilmenevät selvimmin makeavetisissä järviissä, ja korkeita kalan elohopeapitoisuuksia löytyy myös lähellä luonnontilaa olevista järivistä.

Suomessa tutkituista järivistä hauen elohopeapitoisuus ylitti neljässä prosentissa rajan $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ ja 40 prosentissa elohopeapitoisuus oli $0,5 - 1,0 \text{ mg kg}^{-1}$. Mateen elohopeapitoisuudet olivat hauen kanssa samaa tasoa. Ahvenen elohopeapitoisuus on näitä alhaisempi ja särjen ja muikun elohopeapitoisuus on alle $0,5 \text{ mg/kg}$. Suomessa on arvioitu hauen sisältämän elohopean luonnontasoksi n. $0,05 - 0,45 \text{ mg Hg/kg}$. Suuremmat arvot sijoittuvat Etelä- ja Keski-Suomeen ja pienimmät maamme pohjoisosiin (Verta & Rekolainen 1985). Liitteeseen 1 on koottu Mikkelin läänin järvien kalojen elohopeapitoisuuksia vuosilta 1968 - 1985.

Ruotsissa ovat lisääntyneet elohopeapäästöt 1960-luvulla aiheuttaneet kalan elohopeapitoisuuden kasvun arvioidulta luontaiselta $0,2 \text{ mg/kg}$ -tasolta (alueellinen keskiarvo) Keski- ja Etelä-Ruotsissa tasolle $0,5 - 0,9 \text{ mg/kg}$. Tämänäyttypisistä pitoisuusmuutoksista kärsiviä järviä on Ruotsissa arvioitu olevan n. 40 000, ja tietyillä alueilla ovat keskimääräiset pitoisuudet yli 1 mg/kg . Kaikkiaan arvioidaan ruotsalaisia yli 1 ha:n järviä, joiden haukien elohopeapitoisuus on yli 1 mg/kg , olevan n. 10 000 kpl. Happamoitumisen on arvioitu kohottaneen n. 10 000 järven kalojen elohopeapitoisuutta n. $0,1 - 0,3 \text{ mg/kg}$ (Johansson et al 1988).

Ruotsalaiset ovat esittäneet hauen luonnontilaiseksi elohopeapitoisuudeksi $0,05 - 0,2 \text{ mg/kg}$. Arvot perustuvat kuitenkin harvoin Ruotsin ja Norjan tunturialueiden järviin. Suomen vastaaväntyyppisissä järviissä on havaittu vastaavia elohopeapitoisuuksia. Kuitenkin on suomalaisiin tutkimuksiin nojautuen perusteltua olettaa esim. Etelä- ja Keski-Suomen järvien luonnontilaisten elohopeapitoisuuksien olleen em. lukuja korkeampia. Tähän viittaavat mm. Etelä- ja Keski-Suomen yli 100 vuotta vanhojen sedimenttien Pohjois-Suomen järviä korkeammat elohopeapitoisuudet sekä esim. hauen ja särjen elohopeapitoisuuden voimakas riippuvuus orgaanisen aineen pitoisuudesta. Näin on todennäköiseksi hauen sisältämäksi elohopean luonnontasoksi arvioitu n. $0,05 - 0,45 \text{ mg Hg/kg}$ järvestä riippuen. Keskimääräiseksi nousuksi on arvioitu hauessa $0,2 - 0,5 \text{ mg/kg}$ ja suurimmaksi mahdolliseksi nousuksi luokkaa $0,9 \text{ mg/kg}$. Nämä arvot ovat ruotsalaisia arvioita selvästi pienempiä (Verta & Rekolainen 1985).

5 METSÄJÄRVIEN ELOHOPEA - PITOISUUS

Suomessa tutkituista järvistä metsäjärvien haukien elohopeapitoisuuksien on todettu olevan korkeampia kuin viljelyalueilla tai reittivesistöissä sijaitsevien järvien haukien. Nämä tulokset ovat ruotsalaisten tulosten kanssa samansuuntaisia.

Metsäjärvien haukien keskimääräinen elohopeapitoisuus oli kilon painoista haukea kohti laskettuna 0,56 mg/kg ja muiden järvien 0,44 mg/kg. Neljässä prosentissa tutkituista järvistä hauen elohopeapitoisuus ylitti rajan 1,0 mg/kg ja noin 40 prosentissa pitoisuus oli välillä 0,5 - 1,0 mg/kg.

Lapin järvien taso oli keskimäärin 0,28 mg/kg ja kaikissa tutkituissa Lapin säännöstelemättömissä järvissä keskipitoisuus alitti 0,5 mg/kg eli oli selvästi Etelä- ja Keski-Suomen järviä pienempi (Verta & Rekolainen 1985, Verta et al. 1986a).

Ruotsin metsäjärvien haukien elohopeapitoisuudet ovat keskimäärin Suomen metsäjärviä korkeampia. Ruotsissa tutkittujen metsäjärvien humuspitoisuus oli kuitenkin keskimäärin selvästi suomalaisia alhaisempi (väriluku alle 50) (Johansson et al 1988).

Valuma-alueen järvisyys ja valuma-alueen pinta-alan suhde järven tilavuuteen korreloivat hauen elohopeapitoisuuden kanssa. Latvajärvissä, joiden pinta-ala on suuri suhteessa valuma-alueen pinta-alaan, havaittiin alhaisimmat elohopeapitoisuudet. Pienissä latvajärvissä, joiden valuma-alue on suuri, havaitaan toisaalta korkeimmat haukien elohopeapitoisuudet. Valuma-alueen pinta-ala/järven tilavuus -suhteiden on tulkitu kuvaavan huuhtoutuvan materiaalin määrää tai sedimentaation tehokkuutta.

Haukien hitaan kasvunopeuden on suomalaisissa ja myös muissa tutkimuksissa todettu olevan niiden elohopeapitoisuutta kohottava tekijä. Kasvunopeus oli alhaisempi tummissa järvissä. Särjen elohopeapitoisuus ei poikennut näissä järvissä yleisestä tasosta, joten hauen hitaan kasvunopeuden ja poikkeuksellisen korkean elohopeapitoisuuden on katsottu johtuvan näiden järvien ravintoketjun eroista (Verta & Rekolainen 1985).

Tyypillisen suomalaisen metsäjärven teoriassa metyloituvasta ja eliöstöön rikastuvasta elohopeasta on pääosa pohjasedimentin ylimmissä kerroksissa. Vain alle 1 % kokonaiselohopeasta on kalastossa. Metyylielohopeasta kuitenkin arviolta lähes puolet on kalastossa.

Taulukko 1. Kokonaiselohopean (kok. Hg) ja metyylielohopean (met. Hg) määrä Padasjoen Hakojärven Järven pinta-ala on 17 ha ja valuma-alue 1,8 km².

	kok. Hg		met. Hg	
	g	%	g	%
sedimentti (ylin 5 cm)	50	99	0,5	49
pohjaeläimet	0,03	0,06	0,02	2
plankton	0,01	0,02	0,01	1
kalat	0,5	1	0,48	48
yht.	n. 51		n. 1,0	

(Verta & Rekolainen 1985)

Järven valuma-alueelta tulevaksi elohopeakuormitukseksi on arvioitu 2 - 4 g (1,1 - 2,2 g/km²) ja suoraan järven pinnalle korkeintaan 1 g eli 5,8 g/km² (Etelä-Suomi). Suoraan järven pinnalle tuleva elohopea on näin korkeintaan 1/3 järven elohopean sedimentaatiosta ja järven koko elohopeakuormasta vielä vähemmän, koska veden mukana poistuvaa tai haihtuvaa elohopeaa ei ole huomioitu. Näin pääosa elohopeasta olisi peräisin valuma-alueelta (Verta & Rekolainen 1985).

Metsäjärvien sedimenttien pintavesien elohopeapitoisuuden on havaittu vaihtelevan 0,17 - 0,55 mg/kg kuiva-ainetta Etelä- ja Keski-Suomessa. Lapissa sijaitsevien järvien pintasedimentin elohopeapitoisuus vaihtelee 0,02 - 0,05 mg/kg. Sedimentin syvemmissä osissa elohopeapitoisuus on yleensä pienempi. Elohopean kertymisnopeus vaihtelee sedimentin pintaosissa 25 - 50 µg m⁻² a⁻¹ ja on Lapin järvissä alle 10 µg m⁻² a⁻¹. Esim. metsäojitusten erittäin voimakkaasti kuormittamassa Pikku Hakojärven kertymisnopeudeksi on arvioitu n. 370 µg m⁻² a⁻¹.

Sedimentin elohopeapitoisuus korreloi positiivisesti orgaanisen aineen pitoisuuden kanssa ja negatiivisesti veden pH:n kanssa.

Elohopean kasvu on kiihtynyt voimakkaasti 1920-luvulla ja kasvu ilmeni selvimmin valuma-alueeltaan luonnontilaisissa, ojittamattomissa järvissä. Kasvun on katsottu aiheutuneen pääasiassa elohopealaskuuman ja ilmavintäisen elohopean määrän kasvusta.

Metsäojitukset eivät vaikuta merkittävästi sedimentin elohopeapitoisuuteen, mutta ne voivat lisätä elohopean kerääntymistä sedimenttiin lisääntyneen sedimentaation johdosta ääritapauksissa jopa moninkertaisesti, mikä on osoitettu selvästi valuma-alueiden ojituksen yhteydessä tehdyissä sedimenttitutkimuksissa (Rekolainen et al. 1986b).

Metyylielohopea

Sedimentin elohopeasta on tutkimuksissa havaittu korkeintaan 0,1 % vapautuvan vuosittain metyloituneena. Esim. em. Hakojärven tapauksessa eliöstön metyylielo-

hopean tuottamiseen menisi vähintään 10 v (järvestä poistuvaa elohopeaa ei huomioitu). Sedimentissä tapahtuvaa metyylioitumista on sisävesissä yleisesti pidetty tärkeimpänä metyylielohopean tuottajana sisävesissä. Tämä ei kuitenkaan todennäköisesti riitä pitämään yllä eliöstön metyylielohopeatasoa vaan suuri osa metyylielohopeasta lienee peräisin vedessä tapahtuneesta metylaatiosta tai valuma-alueelta (Verta & Rekolainen 1985).

6 SUOMEN TEKOJÄRVIENTEN KALOJEN ELOHOPEAPITOISUUS

Suurimmat elohopeapitoisuudet on Suomessa tavattu uusien tekoaltaiden kaloista, erityisesti hauesta. Vanhempien tekojärvien kalojen elohopeapitoisuudet olivat yleensä uusia alhaisemmat. Hauen elohopeapitoisuuden on havaittu korreloivan positiivisesti veden orgaanisen aineen määrän ja negatiivisesti tekoaltaan iän ja pH:n kanssa.

Suoritetuissa allastus- ja turpeenpuristuskokeissa on havaittu elohopean vapautuvan maaperästä humusyhdisteisiin liittyneenä. Erityisen runsaasti havaittiin elohopeaa vapautuvan hapettomissa olosuhteissa.

Säännöstelyn on arvioitu turvepohjaisilla rannoilla lisäävän elohopeakuormitusta altaan tyhjennyksen aikana jäiden puristaessa turpeesta elohopeapitoista vettä. Kivennäismailla elohopean kuormitusta lisäävästi vaikuttaisi puolestaan humuspitoisen pintakerroksen eroosio.

Savipitoisilla alueilla kalojen elohopeapitoisuudet eivät kohonneet yhtä paljon kuin muilla alueilla, minkä oletettiin johtuvan savimineraalien humus- ja elohopeayhdisteitä saostavasta vaikutuksesta. Vanhoille järvenpohjille rakennetuissa altaissa ei havaittu merkittävästi kohonneita elohopeapitoisuuksia.

Erityisen suuriksi kalojen elohopeapitoisuudet nousivat tekojärvillä, joiden alle oli jäänyt runsaasti happamia keidassoita.

Tekoaltaiden kalojen havaitut elohopeapitoisuudet vaihtelivat seuraavasti eri lajeilla:

hauki	0,32 - 2,1 mg ^{kg⁻¹}
made	0,23 - 1,3 mg ^{kg⁻¹}
ahven	0,35 - 1,4 mg ^{kg⁻¹}
särki	0,21 - 1,1 mg ^{kg⁻¹}
muikku	0,13 - 0,79 mg ^{kg⁻¹}

(Verta et al. 1986b).

7 ELOHOPEAN KOHONNEISIIN PITOISUUKSIIN VAIKUTTA - VISTA TEKIJÖISTÄ

Ruotsalaisissa järvien sedimenttitutkimuksissa on havaittu elohopean kulkeutumisen järviin kasvaneen merkittävästi Etelä- ja Keski-Ruotsissa 1900-luvulla. Pitoisuudet ylimmissä sedimenttikerroksissa olivat noin viisi kertaa korkeampia kuin yli 100 vuotta vanhoissa kerrostumissa. Sitävastoin pohjoisimmissa osissa Ruotsia ei elohopea ole suuremmassa määrin lisääntynyt. Tulokset olivat samansuuntaisia kuin kalojen elohopeapitoisuudesta tehdyt havainnot (Iverfeldt & Johansson 1988, Johansson et al 1988).

Elohopeapäästöt ovat vähentyneet Suomessa ja Ruotsissa radikaalisti 1960-luvulla. Ruotsalaisten tutkimusten mukaan tämä kehitys ei kuitenkaan näy kaloissa, pikemminkin päinvastoin. Osasyllisenä kehitykseen Etelä- ja Keski-Ruotsissa pidetään Euroopasta tulevia päästöjä. Myös pohjoisemmissa osissa Ruotsia havaitaan paikallisesti korkeampia pitoisuuksia. Tähän syylliseksi on havaittu vanhat 40-, 50- ja 60-luvun pistekuormittajat samoilta seuduilta, yleisimmin kloorialkaali-teollisuuden päästöt, joiden päästöjen jäljiltä maaperässä on vanhoja elohopeavarastoja.

Nykyisten ilmalevintäisten päästöjen lähteet ovat olleet toistaiseksi (v. 1984) epäselviä. Tarkkoja tietoja ei ole mm. ulkomaisten päästöjen osuudesta ja myös vanhoilla päästöillä voi olla osuutensa.

Elohopean ilmakulkeutumisen mekanismi ei ole täysin selvillä, ja tärkeitä ovat myös tekijät, jotka vaikuttavat elohopean laskeumaan ilmasta. Uudet ruotsalaiset tutkimukset viittaavat muiden ilman epäpuhtauksien, kuten rikkidioksidin, typen oksidien ja hiilivetyjen laskeumaa lisääviin vaikutuksiin (Johansson et al. 1988).

7.1 HAPPAMOITUMINEN

Ruotsalaisissa tutkimuksissa kohonneiden elohopeapitoisuuksien syitä jäljitettäessä oletettiin aikaisemmin lähinnä happamoitumisen olevan syynä suuriin pitoisuuksiin. Tämän aiheuttivat havainnot korkeimmista pitoisuuksista usein alueilla, joilla vedet kärsivät myös eniten happamoitumisesta. Myöhemmin osoittautui kuitenkin, ettei mitään yksinkertaista tai yksiselitteistä vastausta tähän voida antaa.

Monien muiden metallien osalta happamampi maa ja vesi vapauttavat ne helpommin liikkuviksi, jolloin kasvit ja eläimet keräävät niitä helpommin ja ne kulkeutuvat myös vesistöihin. Elohopean kohdalla tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa.

Elohopealla on useita erikoisominaisuuksia kuten voimakas sitoutuminen humusmateriaaliin. Metsän maaperässä ja vesissä se on lähes täysin humusmateriaaliin

sidottu ja kulkeutuu myös lähinnä sidottuna orgaaniseen materiaaliin.

Happamoitumisen ei katsota vaikuttavan humus-elohopeayhdisteen pysyvyyteen, sitävastoin happamoituminen voi vaikuttaa humusvesien liikkuvuuteen ja tätä kautta myös elohopeaan, mutta kokemukseräistä tietoa asiasta ei ole (Johansson et al 1988).

Happamuuden ympäristössä aiheuttamista muutoksista osa vaikuttaa luultavasti kalojen elohopeapitoisuutta lisäävästi ja toiset todellisuudessa kalojen elohopeapitoisuutta vähentävästi. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus on ruotsalaisten arvioiden mukaan kalojen elohopeapitoisuutta lisäävä. Kuitenkaan ei voida osoittaa mitään yksittäistä prosessia, joka vaikuttaisi happamoitumisen kautta kalojen elohopeapitoisuutta lisäävästi. Myös Kanadassa on happamuuden todettu nostavan kalojen elohopeapitoisuutta. Suomalaisissa tutkimuksissa on todettu happamuuden vaikutuksen kalaston elohopeapitoisuuteen peittyvän muiden ympäristötekijöiden, kuten korkean humuspitoisuuden alle. (Verta & Rekolainen 1985).

Happamoituminen ei kuitenkaan selvitä ongelmaa, koska kohonnut elohopeapitoisuus on ongelma myös järvissä, jotka eivät ole happamoituneita. Myöskään alueet, joilla elohopeapitoisuudet Ruotsissa olivat kaloissa korkeimmat, eivät sijaitse pahimmin happamoitumisesta kärsivillä alueilla (Johansson et al. 1988).

7.2 ELOHOPEAN ESIINTYMINEN ILMAKEHÄSSÄ JA LASKEUMAAN MAHDOLLISESTI VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ

Elohopea esiintyy ilmakehässä kahdessa muodossa. Toinen on metallinen elohopea, jota ilmakehän sisältämä elohopea pääasiassa on. Toinen on ionimuotoinen elohopea, jota ilmakehän elohopeasta on vain noin 3-5 %. Näistä metallinen ei huuhtoudu laskeuman mukana.

Ionimuotoinen elohopea puolestaan muodostaa erilaisia yhdisteitä ilman muiden aineiden kanssa. Juuri ionimuotoinen elohopea tulee laskeuman mukana alas joko veteen liuenneena tai partikkeleihin sidottuna.

Koska ionimuotoinen elohopea muodostaa vain pienen osan ilmakehän elohopeasta, ei se selitä sateen sisältämiä korkeita elohopeapitoisuuksia. Nämä pitoisuudet voivat johtua metallisen elohopean muuttumisesta pilvissä ionimuotoiseksi. Tätä reaktiota voivat puolestaan edistää pilven/sateen happamuus ja ilman suuret otsonipitoisuudet. Em. reaktioiden tärkeydestä elohopealasjeumiin ei ole kuitenkaan tarkkaa tietoa. Jos edellä mainittu pitää paikkansa, vaikuttavat myös muut päästöt, kuten typen oksidit ja hiilivedyt elohopealasjeumiin (Johansson et al 1988).

7.2.1 Suomen elohopealaskeumat

Suomessa kuten Ruotsissakin elohopean laskeuma ja sadeveden elohopeakonsentraatio ovat tutkimusten mukaan korkeampia etelä- kuin pohjoisosissa maata. Korkeampia arvoja saatiin myös kaupunkialueilta. Etelä-Suomessa lumen elohopeapitoisuudet ovat olleet hieman Pohjois-Suomea korkeampia, yleisesti yli 10 mg/l. Pohjois-Suomessa vain muutamat tulokset ylittävät tämän arvon.

Vesisateen elohopeapitoisuudet olivat Etelä-Suomessa suurempia kaupunkialueilla kuin maaseudulla. Pohjois- ja Etelä-Suomen välillä ei havaittu selviä eroja, mutta vesisateesta tehtyjen mittausten pienen määrän vuoksi ei sadeveden pitoisuuksista voida tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä.

Tutkimuksissa havaittiin asutuskeskusten elohopeaemissioiden huuhtoutuvan tehokkaasti sateen mukana alas. Tämä johtunee mm. asutuskeskusten jätteen ja hiilen polton elohopeaemissioiden elohopean vesiliukoisuudesta.

Vesisateen mukana tuleva elohopea kuvaa vain märkälasseuman pitoisuuksia, kun lumesta määriteltä elohopealaskeuma voi sisältää myös muista lähteistä, kuten kuivalasseumasta peräisin olevaa elohopeaa.

Elohopealaskeuma arvioitiin v. 1984 luminäytetulosten perusteella. Lumen keskimääräiseksi pitoisuudeksi arvioitiin n. 5 ng/l ja vuotuiseksi elohopealaskeumaksi laskettiin tämän perusteella (sademäärä 550 mm a⁻¹) noin 3 µg m⁻² a⁻¹. Pohjois-Suomessa laskeuma arvioitiin noin puoleksi tästä arvosta ja Etelä-Suomen laskeumaksi arvioitiin 3 - 6 µg m⁻² a⁻¹.

Lumen vesipitoisuus ei kuitenkaan vastaa kertyneen lumen määrää, sillä etenkin Etelä-Suomessa suuri osa lumesta voi haihtua talven aikana, eikä tiedetä, konsentroituuiko elohopea lumeen vai kulkeutuuko se veden mukana.

Lumen elohopeapitoisuus vaihteli Suomessa tausta-alueella kokonaisuutena <10 - 50 ng/l, kaupunkialueilla 10 - 90 ng/l ja sadeveden <10 - 30 ng/l.

Suomessa mitatut elohopean laskeumat (1,5 - 49,5 µg m² a⁻¹) ovat Ruotsissa mitattujen (5 - 50 µg m⁻² a⁻¹) arvojen kanssa samaa luokkaa (Verta & Rekolainen 1985, Rekolainen et al. 1986a).

Esim. Etelä-Suomessa (Hakojärvi) on laskeuman kautta saatava elohopea n. 5,6 g/km², josta osa haihtuu. Toisaalta kasvien, erityisesti sammalten, on esitetty ottavan aktiivisesti ilmakehästä elohopeaa.

Maaperän pintakerroksen elohopeapitoisuudeksi on Suomessa saatu arvoja n. 0,10 - 0,16 mg/kg (kuivap.).

Mikäli pitkäaikainen keskimääräinen elohopealaskema on ollut alle $10 \text{ g/km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, ei se laskennallisesti ole tutkimusten mukaan voinut nostaa maaperän pintakerroksen elohopeapitoisuutta niin runsaasti, että elohopeapitoisuudet joissakin valuma-alueeltaan luonnontilaistenkin järvien sedimentissä olisivat nousseet nykyiselle tasolle. Näin on oletettu laskeumaperäisen elohopean huuhtoutumisen valuma-alueelta tapahtuvan suoraan lumen sulamisvesien ja sadevesien pintavalunnan kautta.

Yleisesti myös ruotsalaisissa tutkimuksissa on havaittu laskeuman elohopeapitoisuuksien olevan huuhtoutuvan veden pitoisuutta korkeampia (Verta & Rekolainen 1985).

7.2.2 Ruotsin elohopealaskemat

Laskeumat ovat Etelä-Ruotsissa selvästi suurempia kuin maan pohjoisosissa. Osan elohopeasta on arvioitu tulevan myös kuivalaskeumana. Kuivalaskeuma on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin sateen ja lumen mukana tuleva laskeuma.

Etelä-Ruotsissa on elohopean laskeumaksi mitattu n. $20 \text{ g Hg/km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$. Pohjoisimmissa osissa maata vastaava arvo on 7 g. Lisäksi paikallisesti kohonneita arvoja havaitaan myös noin 50 km:n säteellä suurempien pistekuormittajien läheisyydessä. Sadeveden elohopeapitoisuus vuosikeskiarvona on Etelä-Ruotsissa noin 30 ng (nanogrammaa) elohopeaa/litra ja pohjoisosissa noin 10 ng/l. Näyttääkin todennäköiseltä, että mm. Tanskan ja Etelä-Ruotsin elohopealaskema on suurelta osin keskieuropalaista alkuperää ja pohjoisessa suurin osa on "kotimaista" alkuperää.

Kokonaislaskeumaksi Ruotsissa on arvioitu noin 6 tonnia/vuosi ja lisäksi n. 2 tonnia/vuosi suurimpien pistekuormittajien ympäristössä eli yhteensä 8 tonnia/a. Elohopean siirtymistä maalta ja vesistä takaisin ilmaan tapahtuu myös, mutta sen osuus on varsin pieni (Johansson et al 1988).

7.2.3 Kaukokulkeutuminen

Keski-Euroopasta ilman mukana tulevista elohopeapäästöistä tiedetään suhteellisen vähän. Muutamien energiatuotantoon ja teolliseen toimintaan perustuvien karkeitten arvioiden pohjalta suhteellisesti suurimmat päästöt tulevat Itä-Euroopasta. Esimerkiksi Länsi-Saksan ja Iso-Britannian kohdalla laskettu elohopeapäästöjen määrä on n. 0,5 - 1 g asukasta kohden vuodessa ja Ruotsin kanssa samaa luokkaa.

Karkean arvion mukaan koko Euroopan elohopeapäästöt ovat n. 400 tonnia vuodessa ja suurin lähde on hiilen poltto.

Pohjoismaisten mittausten mukaan elohopean pitoisuudet ovat suhteellisen tasaisia pohjoismaissa, keskimäärin 2 - 3 ng/m³ (Johansson et al. 1988).

7.3 HUMUKSEN VAIKUTUKSET MAAPERÄN ELOHOPEALASKEUMAAN

Sadannan mukana maahan tullut elohopea sitoutuu hyvin nopeasti maaperän ylimmän kerroksen humusmateriaaliin. Nämä maakerrokset "suodattavat" toisinsanoen tehokkaasti laskeumien elohopean. Raakahumuksen suuri elohopean sitomiskyky perustuu sen suureen hitaasti hajoavan orgaanisen aineksen pitoisuuteen. Pohjavesiin joutuu tämän johdosta yleensä hyvin vähän elohopeaa. Humuskerroksen elohopeapitoisuus kuvastaakin lähinnä ilmakehästä tulleen elohopean määrää. Humuskerroksen alla olevan maaperän elohopeapitoisuus riippuu taas maaperän laadusta eikä heijastu humuskerroksen elohopeapitoisuuksissa.

Suurimmat elohopeapitoisuudet löytyvät yleensä alueilta, joilla on aikaisemmin ollut suuria elohopeapäästöjä, usein esim. Ruotsissa yli 0,3 mg/raakahumuskilo. Luonnon taustapitoisuudeksi on arvioitu pohjoisimpien osien perusteella n. 0,1 mg/kg. Suomessa arvot ovat olleet samaa luokkaa, n. 0,1 - 0,2 mg/kg (kuivapaino). Ruotsin keskimääräinen humuksen sisältämä elohopeapitoisuus on noin 2,5 kg/km². Teoreettisesti on Ruotsissa arvioitu elohopeamäärän kasvavan maaperässä muutamman prosentin vuodessa ja karkeasti arvioiden ovat maaperän humuksen elohopeapitoisuudet tausta-arvoon verrattuna n. 2 - 5 -kertaisia.

Maaperän (lähinnä pintahumus) elohopeamäärä on Ruotsin alueella n. 600 tonnia, josta antropogeenistä alkupe-
rää on n. 400 tonnia (Verta & Rekolainen 1985, Johansson et al 1988).

Suomessa sekä teko- että luonnonjärvien kalojen elohopeapitoisuuden on havaittu riippuvan veden orgaanisen aineksen määrästä, lähinnä humuksesta. Osassa tehdystä tutkimuksesta on saatu viitteitä elohopean sitoutumisesta pääosin suurimolekyyliseen humushappo-fraktioon.

Kirjallisuuden perusteella elohopean sitoutuminen orgaaniseen ainekseen maaperässä, sedimentissä ja vedessä onkin selvää. Edelleen on havaittu erityisesti humuksen fulvohappojen, pienimolekyylinen fraktio, pysyvän metyloimaan abioottisesti epäorgaanista elohopeaa metyylielohopeaksi. Sekä maaperässä että vesistöissä elohopea metyloituu kuitenkin todennäköisesti pääasiassa biologisesti ja rikastuu metyylielohopeana eliöstöön (Verta & Rekolainen 1985).

7.4 ELOHOPEAN KULKEUTUMINEN MAALTA VETEEN

Vesi huuhtelee maaperästä humusta ja kuljettaa sitä edelleen vesistöihin. Näin huuhtoutuu myös humukseen sidottu elohopea eteenpäin. Humuksen huuhtoutumisen määrä vaihtelee riippuen mm. valuma-alueen maaperän laadusta ja veden vaihtuvuudesta.

Ruotsissa on esim. raskasaineksisen moreenimaan, jolla on vähän suota, havaittu päästävän läpi enemmän elohopeaa kuin alueitten, joilla vesi kulkee sammal- ja suomaiden läpi.

Suurien virtaamien, lähinnä kevät ja syksy, aikana ovat vesien mukana kulkevat elohopeamäärät suurimmillaan. Vesi on tällöin myös hieman happamampaa, humuspitoisempaa sekä niukkasuolaisempaa kuin keskimäärin. Ruotsissa mitatut "elohopeavirrat" vaihtelivat välillä $1 - 6 \text{ g/km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$.

Maaperästä valumaveden mukana huuhtoutuva elohopeamäärä on vain joitakin tuhannesosia maaperän pintakerrokseen varastoituneesta määrästä. Tämän perusteella on arvioitu maaperästä huuhtoutuvan elohopean määrän säilyvän kauan korkeana, vaikka päästöjä radikaalisti vähennettäisiinkin.

Elohopea kulkeutuu vesistöihin tietysti myös laskeutena suoraan veteen, jolloin järven valuma-alueen koko suhteessa sen pinta-alaan on ratkaiseva. Valuma-alueelta tuleva elohopeakuorma on ainakin helpohkosti huuhtoutuvilta alueilta dominoivassa asemassa (Johansson et al 1988).

Päästöjen seurauksena elohopean pitoisuudet ovat nouseeet koko järviekosysteemeissä: vedessä, sedimentissä ja kaikissa ravintoketjun organismeissa. Eri tyyppiset järvet reagoivat myös eri tavalla lisääntyneeseen elohopeakuormaan. Mm. Ruotsin ravinnerikkaimmissa järvisä ovat kalojen elohopeapitoisuudet yleensä alhaisia. Yhtenä syynä tähän on pidetty näiden järvien organismien suurta määrää, jolloin elohopea on jakautuneena suurempaan elävän materiaalin määrään. Toisaalta elohopeaa huuhtoutuu näillä alueilla todennäköisesti vähemmän vesistöihin kuin metsäalueilla, koska valumavesi suotautuu täällä paksumpien maakerrosten läpi (slättland) ja elohopea sitoutuu matkalla ylempiin maakerrokseen.

Ruotsin yleisimmässä järvityypissä, metsäjärvissä, on ravinteita yleensä vähän ja eliöstö näin vähäisempi, jolloin elohopean määrä yksilöä kohti olisi suurempi ja myös suhteellisen pieni pitoisuuden kasvu näkyisi kaloissa. Vastaavantyyppiset järvet ovat yleisiä Skandinaviassa ja Pohjois-Amerikassa. Näissä osissa maailmaa esiintyy myös vastaava elohopeaongelma. Keski-Euroopassa sitävästoin ongelma on pienempi huolimatta elohopean esim. Ruotsia merkittävästi suuremmasta laskeumasta (Iverfeldt & Johansson 1988, Johansson et al 1988).

7.5 VALUMA-ALUEELLA SUORITETTUIEN TOIMENPITEIDEN VAIKUTUKSET KALOJEN ELOHOPEAPITOISUUTEEN

Latvajärvillä ei suomalaisissa tutkimuksissa ole voitu havaita metsänhoitotoimenpiteiden vaikutuksia kalaston elohopeapitoisuuteen verrattuna järviin, joiden valuma-alueella ei mainittavia toimenpiteitä ollut suoritettu. Esim. Evon latvajärvillä suorituksissa tutkimuksissa todettiin metsätaloudellisten toimenpiteiden vaikutuksen kalojen elohopeapitoisuuteen olevan vaikeasti arvioitavissa.

Tulos tuntuu kalaelohopean osalta yllättävältä, koska ojitusten on todettu lisänneen järviin kohdistuvaa elohopeakuormitusta. Metsäojituksessa elohopeakuormituksen lisäys tapahtuu kuitenkin pääasiassa kiintoainekseen sitoutuneena elohopeana, joka sedimentoituu nopeasti.

Myös liukoisen orgaanisen aineksen kuormitus nousee välittömästi metsäojituksen jälkeen, ja kuormituksen lisäys johtuu näissä tapauksissa erityisesti virtaaman lisäyksestä. Kalaelohopea on riippuvainen juuri liukoisen orgaanisen aineen pitoisuudesta. Veden korkealla kiintoainespitoisuudella voi mahdollisesti olla jopa kalaelohopeaa vähentävä vaikutus.

Metsänhoidollisten toimenpiteiden rehevöittävä vaikutus saattaa myös estää kalojen elohopeapitoisuuden kasvua (vrt. suomalaiset ja ruotsalaiset rehevämät järvet) (Verta & Rekolainen 1985, Rekolainen et al. 1986b). Mm. sedimentin elohopean myöhempi metyloituminen ja mahdollinen siirtyminen vesieliöihin on vielä epäselvää, ja mahdolliset uudet tutkimukset tuonevat lisätietoa esim. metsäojitusten ja kalaelohopean välisistä yhteyksistä.

8 S U O M E N E L O H O P E A P Ä Ä S T Ö T

Elohopean käyttö jakautuu Suomessa seuraavasti (t/a):

- kloorialkaaliteollisuus	3 - 4,4 t/a
- hammaslääketiede + farmasia	3,4 "
- paristojen valmistus ja käyttö	1,8 "
- laboratoriot	3,0 "
- mittalaitteet, sähkötekniiset laitteet	0,8 "
- maatalous	2,3 "

Taulukon tiedot eivät ole kovin tarkkoja ja perustuvat osin n. 10 vuotta vanhoihin tietoihin (Baltic Marine Environment Protection Commission 1987).

Suomessa ihmisen toiminnasta aiheutuvat päästöt ilma-kehään on arvioitu hieman yli yhdeksi tonniksi vuodessa (Ympäristönsuojeluneuvosto 1982). Tästä määrästä noin puolet on peräisin kloorialkaaliteollisuudesta ja muu osa pääasiassa fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja rautateollisuudesta.

Maaperään joutuu Suomessa elohopeaa n. 2 t/vuosi peittäusaineiden mukana. Suoraan vesistöihin johdetaan elohopeaa hieman yli 100 kg/vuosi.

Päästöt sekä vesiin että ilmakehään olivat huomattavasti suurempia 1960-luvun lopulle asti, jolloin ilmakehään kohdistuva kuormitus oli n. 3 t/vuosi ja vesiin kohdistuva n. 1 t/vuosi (Ympäristönsuojeluneuvosto 1982, Verta & Rekolainen 1985).

Kloorialkaaliteollisuus

Kloorialkaaliteollisuuden päästöt lisääntyivät huomattavasti prosessimuutosten johdosta 1940-luvun jälkeen, mutta niitä on 1970- ja 1980-luvuilla saatu päästörajoituksilla ym. toimin pienennettyä murto-osaan 1970-luvun päästöistä.

Kloorialkaaliteollisuuden päästöt on Suomessa rajoitettu vesiviranomaisten toimesta 0,2 grammaan tuotettua klooritonnia kohti. Vesituomioistuimen päätöksellä arvo on myöhemmin muutettu 0,3 g:aan/klooritonni.

Teollisuuden ilmastointi-ilman elohopeapäästöissä on päästy arvoon 3 - 5 g tuotettua klooritonnia kohti. Syntyvän vetykaasun elohopeapitoisuus on tarkoitus vähentää 1 g:aan tuotettua klooritonnia kohti ja teollisuuden toimesta on lipeän elohopeapitoisuus pidetty arvossa 0,2 - 0,5 mg/l. Em. arvot ovat Ruotsin kanssa samaa luokkaa (Baltic Marine Environment Protection Commission 1987).

Esimerkkinä kloorialkaaliteollisuuden elohopeapäästöjen pienenemisestä esitetään Kymi-Strömberg Oy:n Kymin paperi- ja klooritehtaan elohopeapäästöt vesistöön 1950-luvulta nykypäivään.

1950-67	550	kg/a
1968	250	"
1969	210	"
1970-74	150	"
1975	60	"
1976	74	"
1977	28	"
1978	1,7	"
Nykyinen noin	0,75	"

Päästöt ilmaan ovat kuitenkin n. 150 kg/a. (Kokko & Turunen 1988.)

Muu teollisuus

Puunjalostusteollisuuden käyttämien elohopeapitoisten limantorjunta-aineiden käyttö on lopetettu v. 1968 alussa ympäristövaikutusten selvittyä. Aikaisemmin limantorjuntaan käytettiin näitä aineita kuitenkin runsaasti (Kokko & Turunen 1988).

Esim. kaivos- ja metalliteollisuudessa kuten sulatois-

sa elohopeapäästöt eivät ole vähentyneet yhtä radikaalisti.

Muita merkittäviä elohopeapäästöjen lähteitä ovat fossiilisten polttoaineiden käyttö, hammaslääketiede sekä maatalous.

Jätteiden poltto

Suomen jätteiden polton elohopeapäästöistä ei ole käytettävissä arvioita, mutta jätteiden polton päästöt ovat suhteiltaan kuitenkin karkeasti Ruotsin kanssa samantyyppisiä, joten seuraavassa esitetään Ruotsin arvioita jätteiden polton elohopeapäästöistä.

V. 1984 arvioitiin jätteiden poltosta aiheutuvien päästöjen olevan Ruotsissa n. 5 - 6 tonnia elohopeaa vuodessa. Tästä määrästä arvioitiin yhdyskuntajätteen polton päästöjen osuudeksi n. 3 tonnia/vuosi. Enemmän kuin puolet yhdyskuntajätteen elohopeasta on peräisin käytetyistä paristoista (elohopea- ja alkaaliparistot). Ratkaisu paristo-ongelmaan on luopuminen elohopeapitoisten paristojen käytöstä ja paristojen keräys. Nykyään saadaan Ruotsissa kerätyksi n. 50 % käytetyistä paristoista, ja tavoitteena on vähintään 75 %:n kerääminen.

Puolet jätteistä poltetaan kalkkipuhalluksella tai savukaasukondensoinnilla varustetuissa laitoksissa, jotka kykenevät puhdistamaan elohopeasta n. 90 %. Edelleen tulee Ruotsin kaikkien polttolaitosten täyttää korkeintaan 0,08 mg Hg:n vaatimus savukaasukuutiometriä kohti v. 1991 mennessä ja tämän jälkeen pyritään määrään 0,03 mg Hg/savukaasu-m³. Toimenpiteet ovat myös tuottaneet tulosta, ja nykyään arvioidaan jätteidenpolton päästöiksi noin 1 tonni elohopeaa vuodessa ja tulevaisuudessa on arvioitu päästävän muutamaa sataan kg/vuosi (Johansson et al. 1980).

9 ELOHOPEAONGELMAN TULEVAISUUS

9.1 PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN

Ruotsalaisten selvitysten mukaan elohopeaongelman tulevaisuus ei ole erityisen valoisa. Päästöjen voimakkaan vähentämisen johdosta kalojen elohopeapitoisuuksien kasvu on hidastunut, mutta ei odotusten mukaisesti. Tämän kehityksen on oletettu johtuvan vanhojen päästöjen vaikutuksesta, ja kalojen nykyisten korkeiden elohopeapitoisuuksien katsotaan olevan maaperään vuosikymmenien aikana varastoituneen laskeuman tulosta. Pitoisuuksien on maaperässä arvioitu todennäköisesti kasvavan myös nykyisillä päästömäärillä, joskin hitaammin. Kasvu puolestaan lisää elohopean kulkeutumista vesistöihin, ja vaikka kulkeutuminen maaperään vähenisi reilusti, on vanhoja elohopeavarastoja maaperässä kertyneenä todennäköisesti sadoiksi vuosiksi.

Osa ongelmasta voitaneen ratkaista pienentämällä hapolaskeumaa ja vesien kalkitsemisella. Näillä keinoin voidaan ehkä vähentää huippuarvoja, mutta kokonaisuutena elohopeapitoisuudet tulisivat olemaan esim. Ruotsissa kuitenkin liian korkealla tasolla. Myös jäljelläoleviin elohopealähteisiin täytyisi puuttua, jotta kalojen elohopeapitoisuuksia voitaisiin ruotsalaisten arvioiden mukaan yleisemmin vähentää (Johansson et al 1988).

9.2 KALOJEN ELOHOPEAPITOISUUDEN VÄHENTÄMINEN ITSE JÄRVEEN KOHDISTUVILLA TOIMENPITEILLÄ

Kalkituksella on hyvät mahdollisuudet vähentää yksittäisen järven kalojen korkeita elohopeapitoisuuksia. Esim. koko järven valuma-alueen kalkitus voi vähentää elohopean kulkeutumista maaperästä. Seleenikäsittely on uusi menetelmä, jolla on saatu hyviä tuloksia alustavissa kokeissa. Näitä menetelmiä kokeillaan Ruotsissa tällä hetkellä projektissa, joka päättyy v. 1989 ja tarkoituksena on käytäntöä ajatellen sopivimpien menetelmien löytäminen.

Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa, joissa happamoituneiden, kirkkaiden järvien pH on kalkituksella nostettu tasosta 4,8 - 5,5 tasolle 7,0 - 7,2, on havaittu selvä vesieliöstön elohopeapitoisuuden lasku (Johansson et al 1988). Humuksen happamoittamien järvien kalkituksen vaikutuksesta veden laatuun ja kalaelohopeaan ei kuitenkaan juuri ole tietoa.

Seleenilisäyksen on kanadalaisissa tutkimuksissa todettu alentaneen elohopean rikastumista haukeen.

Suomalaisessa tutkimuksessa on korkean elohopeapitoisuuden omaavissa hauissa todettu alhaisia seleenipitoisuuksia. Samoin sekä elohopeaa että seleeniä on tekoaltaiden haukien maksassa suhteessa lihakseen havaittu enemmän kuin luonnonjärvissä, minkä on katsottu viittaavan maksassa tapahtuvaan elohopean ja seleenin vuorovaikutukseen (Verta & Rekolainen 1985, Leskinen et al. 1986).

Tehokkaan kalastuksen avulla voidaan kalaston elohopeapitoisuutta alentaa edellyttäen, että kalojen kasvunopeus paranee ja/tai kalastuksella poistetaan enemmän metyylielohopeaa kuin mitä metyloitumis- ja rikastumisprosessit tuottavat (Verta & Rekolainen 1985).

Padasjoen Hakojärvellä on tehokalastuksella saatu positiivisia tuloksia ja mm. hauen ja mateen elohopeapitoisuudet laskivat selvästi tehokalastuksen seurauksena. Haukien osalta elohopeapitoisuuksien laskun katsottiin aiheutuneen hauen paremmasta kasvusta ravintoyksikköä kohti. Mateiden elohopeapitoisuuden pienenevän katsottiin puolestaan aiheutuneen pääravintokohteen vaihtumisesta kalaravinnosta pohjaeläinravinnoksi (= ravintoketjun "alemmalle portaalle") (Iivonen & Verta 1989).

L Ä H D E L U E T T E L O

- Baltic Marine Environment Protection Commission 1987. Progress reports of cadmium, mercury, copper and zinc. Baltic sea environment proceedings.
- Environmental protection agency (EPA) 1973. Water quality criteria 1972. A report of the committee on water quality criteria. Washington D.C.
- Iivonen, P., Verta, M. 1989. Tehokalastus alentaa kalaston elohopeapitoisuutta. Suomen kalastuslehti 8. 390 - 393.
- Iverfeldt, Ä., Johansson, K. 1988. Mercury in run-off water from small watersheds. Veria. Internat. Verein. Limnol. 23. 1626 - 1632.
- Johansson, K., Lindqvist, O., Timm, B., 1988. Kvicksilvers förekomst och omsättning i miljön. Statens naturvårdsverk. Rapport 3470.
- Kokko, H., Turunen, T. 1988. Kymijoen alaosaan kohdistunut elohopeakuormitus ja hauen elohopeapitoisuus vuoteen 1986 saakka. Vesitalous 3: 30 - 38.
- Leskinen, J., Lindqvist, O.V., Lehto, J., Koivistoinen, P. 1986. Selenium and mercury contents in northern pike (*Esox lucius*, L.) of Finnish man-made and natural lakes. Publications of the Water Research Institute, National Board of Waters and Environment, Finland. No 65: 72 - 79.
- Mannio, J., Verta, M., Kortelainen, P., Rekolainen, S. 1986. The effect of water quality on the mercury concentration of northern pike (*Esox lucius*, L.) in Finnish forest lakes and reservoirs. Publications of the Water Research Institute, National Board of Waters, Finland. No 65: 32 - 43.
- Rekolainen, S., Verta, M., Järvinen, O. 1986a. Mercury in snow cover and rainfall in Finland 1983-1984. Publications of the Water Research Institute, National Board of Waters, Finland No 65: 3 - 10.
- Rekolainen, S., Verta, M., Liehu, A. 1986b. The effect of airborne mercury and peatland drainage on sediment mercury contents in some Finnish forest lakes. Publication of the Water Research Institute, National Board of Waters, Finland No 65: 11 - 20.
- Surma-aho, K., Paasivirta, J., Rekolainen, S., Verta, M. 1986. Organic and inorganic mercury in the food chain of some lakes and reservoirs in Finland. Publication of the Water

Research Institute, National Board of Waters,
Finland No 65: 59 - 71.

Verta, M., Rekolainen, S. 1985. Ilmaperäisen elohopean, metsäojituksen ja tekojärvien rakentamisen vaikutus kalojen elohopeapitoisuuteen. Vesihallituksen monistesarja nro 320.

Verta, M., Rekolainen, S., Mannio, J., Surma-aho, K. 1986a. The origin and level of mercury in Finnish forest lakes. Publication of the Water Research Institute, National Board of Waters, Finland No 65: 11 - 20.

Verta, M., Rekolainen, S., Kinnunen, K. 1986b. Causes of increased fish mercury levels in Finnish reservoirs. Publication of the Water Research Institute, National Board of Waters, Finland No 65: 44 - 58.

Ympäristönsuojeluneuvosto 1982. Suomen ympäristön tila. Sisäasianministeriö, ympäristönsuojeluosaston julkaisusarja A:14. 328 s.

MIKKELIN VESI- JA YMPÄRISTÖPIIRIN KOKOAMIA TIETOJA KALOJEN
ELOHOPEAPITOISUUKSISTA MIKKELIN LÄÄNIN JÄRVISSÄ V. 1968-85

Pyyntipaikka Koordinaatit	Vesis- töalue	Pyyntiaika	Kala	Kpl	Yht.- paino g	Keski- paino g	Elohopeapitoisuus tuore- painoa kohti mg/kg				
							min	ka	max	1 kg:n hauki	
Pyhävesi, Pyhäsaaren ranta, Mäntyharju 3-681330-49130	14.97	15.8.-79	ahvenia		550			0,14			
Pyhävesi, Mäntyharju 3-681360-49190	14.97	15.8.-79	haukia		875			0,17			
Peruvesi, Pertunmaa 3-681610-47710	14.91	16.8.-79	ahvenia		500			0,06			
Peruvesi, Pertunmaa 3-682240-47340	14.91	16.8.-79	haukia		725			0,15			
Korpijärvi, Halmeniemmi, Mäntyharju 3-679780-51050	04.14	16.8.-79 15.8.-79	ahvenia hauki	1	1050	550		0,07 0,25			
Konnivesi, Haukkaselkä, Heinola 3-678090-45740	14.13	26.9.-79 10.9.-79	hauki ahven	1 1		950 210		0,59 0,26			
Konnivesi, Hepolahti, Heinola 3-678810-45690	14.13	24.9.-79	ahven	1		190		0,44			
Imjärvi, Haapaselkä, Heinola 3-680030-45940	14.17	19.9.-79 19.9.-79	ahven hauki	1 1		250 750		0,14 0,17			
Ruotsalainen, Heinola	14.14	huhti-toukok. 1980 1971 1968	hauki	6		720	0,43	0,61	0,87	0,78 0,84 1,0	
Haukivesi, Varkauden ap.	04.21	huhti-toukok. 1980	hauki	5		1050	0,47	0,69	0,87	0,68	
Siitinselkä, Joroinen	04.21	kevät-80 kevät-80	mäde ahven	1 2	35,25	440		0,17 0,25			
Mankilansaaren Haasian- saari, Kangaslampi	04.21	kevät-80	ahven	2	40,25			0,21			
Tappuvirta, Kangaslampi	04.21	kevät-80	ahven	2	20,20			0,37			
Torninselkä, Rantasalmi	04.21	kevät-80	mäde	1		690		0,23			
Jukajärvi, Juva 3-686220-54690	04.17	29.10.79 29.10.79 15.10.79	hauki ahven mäde	1 2 1		790 205 ?	0,23	0,33 0,24 0,33	0,24		
Iso-Kontunen, Juva	04.17	14.5.80 13.5.80 13.5.80 13.5.80 13.-14.5.80 3.-9.10.80 9.10.80 tammik.-81 tammik.-81 tammik.-81 17-21.9.81	säyne mäde lahna ahven hauki hauki mäde hauki mäde lahna hauki	1 1 1 1 4 3 2 6 3 2 5		425 600 600 35 650 1345 610 1130 805 525 1245		0,13 0,53 0,15 0,38 0,14 0,41 0,41 0,99 0,78 0,28 0,70	0,40 0,70 0,45 1,11 0,98 1,34 1,26 0,29 1,25	0,65 1,16 0,48 1,34 1,26 0,31 1,25	1,07
Kangasjärvi, Juva ym.	04.25	tammik.-81 tammik.-81	hauki mäde	4 1		695 695	0,53	0,71 0,67	0,87	0,86	
Rautjärvi, Juva	04.16	28.9.81	hauki	5		1810	0,45	0,67	0,89		
Niskajärvi, Pieksämäen mlk 3-6901-499	14.93	15.2.-10.3.81	hauki	7		580	0,53	0,56	0,60	0,72	
Kutemajärvi, Kangasniemi 3-6894-487	14.96	1.4.-5.5.81 1.4.-5.5.81	hauki mäde	5 1		580 1060	0,40	0,51 0,31	0,61	0,44	
Puula, luoteisosa, Kangasniemi 3-6864-467	14.92	1.-20.4.81	hauki	5		800	0,46	0,58	0,74	0,80	
Niittulevä, Kangasniemi 3-6875-496	14.93	25.2.-10.3.81	hauki	4		660	0,61	0,75	0,86	0,91	
Paihmaa, Pieksämäen mlk 3-6895-490	14.96	1.4.-1.5.81	hauki	5		670	0,84	0,92	1,00	0,92	
Nevajärvi, Juva 3-687540-52570	04.25	1.-15.3.81 1.-15.3.81	hauki mäde	5 4		710 515	0,54 0,28	0,59 0,32	0,63 0,36	0,60	
Virmajärvi, Virtasalmi 3-688940-52840	04.25	1.4.-4.5.81 3.-8.3.81	hauki mäde	4 2		770 695	0,49 0,28	0,59 0,35	0,70 0,42	0,64	
Saimaa, Mikkelin ap. 3-684070-51600	04.15	1.-20.4.81 1.-20.4.81	hauki mäde	5 1		810 410	0,16	0,27 0,21	0,36	0,29	

LIITE 1/2

Pyyntipaikka Koordinaatit	Vesis- töalue	Pyyntiaika	Kala	Kpl	Yht.- paino g	Keski- paino g	Elohopeapitoisuus tuore- painoa kohti mg/kg			
							min	ka	max	1 kg:n hauki
Sysmäjärvi, Joroinen 3-6889 -541	04.25	1.4.-20.4.81	hauki	5		675	0,37	0,41	0,45	0,43
Verijärvi, Mikkelin mlk 3-6845 -507	14.92	21.6.-12.7.81	hauki	5		490	0,22	0,36	0,60	
Loukee, Mikkelin mlk 3-6861 -519	04.16	27.4.-16.5.81	hauki	2		1025	0,37	0,50	0,63	
Haapajärvi, Virtasalmi 3-6886 -518	04.25	huhtik.-81	hauki	5		950	0,37	0,48	0,56	0,47
Lylyjärvi, Mikkelin mlk 3-6858 -521	04.16	4.4.-24.5.81	hauki	5		500	0,42	0,62	0,85	~1,27
Liskojärvi, Mikkelin mlk 3-6861 -520	04.16	5.5.81	hauki	2		710	0,32	0,38	0,43	
Tuusjärvi, Rantasalmi 3-687130-55750	04.17	16.5.81	hauki	1		2120		0,48		
Kolmipohja, Haukivuori 3-689610-48882	14.96	18.5.81	hauki	1		890		0,40		
Valvatus, Joroinen 3-6901 -543	04.21	27.3.-19.4.81	hauki	6		530	0,17	0,20	0,25	0,16
Joroisselkä, Joroinen 3-6895 -547	04.21	16.3.-17.4.81 2.4.81	hauki made	3 1		895 550	0,24 0,22	0,25 0,22	0,27	0,26
Suuri Vehkajärvi, Kerimäki 3-6876 -613	04.18	1.-25.4.81	hauki	4		1020	0,27	0,33	0,39	0,33
Kaita, Joroinen 3-688050-54050	04.17	17.-18.5.81	hauki	7		625	0,08	0,11	0,13	0,11
Paljo, Joroinen 3-688100-54122	04.17	18.-20.5.81	hauki	2		720	0,13	0,14	0,15	
Sonnenan, Heinolan mlk 3-6798 -469	14.17	1.-10.3.81	made	6		790	0,17	0,23	0,32	
Kermajärvi, Heinävesi 3-6927 -585	04.27	10.3.81 28.2.-10.3.81	hauki made	1 5		1060 625		0,34 0,31	0,34	0,38
Korpijärvi, Mikkelin mlk 3-6846 -504	14.92	toukok.- 18.7.81	hauki	4		820	0,17	0,23	0,30	0,25
Nuoramoinen, Sysmä 3-6814 -437	14.81	15.3.-5.4.81 15.3.81	hauki made	4 1		850 950	0,20	0,23 0,16	0,25	0,22
Kolkonjärvi, Rantasalmi 3-6874 -565	04.24	23.4.-18.5.81	hauki	5		1130	0,15	0,22	0,24	0,23
Puula, Vanhasalmi, Mikkelin 3-6852 -494 mlk	14.92	7.7.81	hauki	1		800		0,25		
Salajärvi, Hartola	14.17	28.3.82 28.3.82	hauki made	3 1		590 610	0,25	0,27 0,17	0,29	
Joutsjärvi, Hämälänranta, Sysmä	14.81	1.5.82	hauki	2		1260	0,24	0,30	0,36	
Harvalanselkä, Salonsaari Sysmä	14.81	1.5.82	hauki	1		640		0,25		
Harvalanselkä, Tenniranta Sysmä	14.81	1.5.82	hauki	1		720		0,21		
Kyyvesi, Mustaselkä Mikkelin mlk	14.93	kevät -82	hauki	1		1030		0,52		
Ala-Sitro, Mikkelin mlk	14.93	kevät -82	hauki	1		430		0,28		
Ylä-Sitro, Mikkelin mlk	14.93	kevät-82	hauki	1		690		0,29		
Pieksjärvi, Pieksämäki	14.79	24.5.82	hauki	5		900	0,19	0,24	0,29	
Pieni Vehkajärvi, Kerimäki	04.18	kevät -82	hauki	3		910	0,18	0,21	0,23	
Ylimmäisenjärvi, Kangasniemi	14.96	10.5.82	hauki	3		900	0,44	0,51	0,63	
Soukkio, Kangasniemi	14.93	2.5.82	hauki	3		650	0,36	0,42	0,48	
Härkäjärvi, Kangasniemi	14.96	2.5.82	hauki	3		570	0,43	0,51	0,56	
Salajärvi, Heinolan mlk	14.94	20.6.82	hauki	3		340	0,40	0,43	0,48	
Ristijärvi, Heinolan mlk	14.17	2.6.82	hauki	3		730	0,43	0,53	0,69	
Ruokojärvi Pieksämäen mlk	04.25	kesä 1982	haukia				0,53	0,65	0,78	
Tuoppujärvi Pieksämäen mlk	04.25	kesä 1982	haukia					0,45		
Suovu, Haukivuori	14.93	kesä 1982	hauki	2		>1000	0,52	0,56	0,61	
Iso-Tylönen, Haukivuori	04.25	kesä 1982	hauki	1		1500		0,58		
Pieni-Tylönen Haukivuori	04.25	kesä 1982	hauki	1		>1000		0,49		

Pyyntipaikka	Vesistöalue	Pyyntiaika	Kala	Kpl	Yht.-paino g	Keski-paino g	Elohopeapitoisuus tuore-painoa kohti mg/kg			
							min	ka	max	1 kg:n hauki
Pyhitynjärvi, Pieksämäen mlk	04.25	24.4.-8.5.83	hauki	4	3350	838	0,32	0,36	0,40	
Pyhäjärvi, Loukkulahti, Pieksämäen mlk	14.93	30.4.-5.5.83	hauki	4	4050	1013	0,42	0,49	0,62	
Naarajärvi, Pieksämäen mlk	14.93	1.5.-7.5.83	hauki	4	3400	850	0,51	0,55	0,67	
Maavesi, Mustaniemi, Maavuslahti, Pieksämäen mlk	04.25	19.4.-1.5.83	hauki	4	3600	900	0,41	0,59	0,66	
Iso-Nivu, Pieksämäen mlk	14.93	1.5.-8.5.83	hauki	4	2680	670	0,52	0,78	1,2	
Iso-Naakkima, Koiralahti Pieksämäen mlk	14.93	1.5.-8.5.83	hauki	4	4130	1033	0,47	0,54	0,66	
Längelmäenjärvi, Virtasalmi	04.25	huhti-toukok. 1983	hauki	4	4650	1163	0,40	0,50	0,67	
Salmenjärvi, Kiiskisen mutahaudan suu, Virtasalmi	04.25	28.4.-6.5.83	hauki	4	2800	700	0,40	0,49	0,54	
Ankele, Pulukko, saaret Virtasalmi	04.25	4.5.-7.5.83	hauki	3	3300	1100	0,81	0,83	0,84	
Pölkönjärvi, Virtasalmi	04.25	1.5.-8.5.83	hauki	4	3700	925	0,48	0,52	0,56	
Syvänsi, Vitikkaselkä, Jäppilä	04.25	3.5.-7.5.83	hauki	4	3850	963	0,36	0,43	0,49	
Sorsavesi, Leväselkä, Jäppilä	04.26	25.4.-7.5.83	hauki	4	3400	850	0,49	0,58	0,69	
Suontee, Jäppilä	14.78	23.4.-9.5.83	hauki	4	3650	913	0,44	0,46	0,49	
Iso-Rummukka, Jäppilä	04.25	4.5.83	hauki	1		700		0,99		
Kyyvesi (kirkonkylä), Marjo- ja Ritoniemi, Haukivuori	14.93	27.4.-1.5.83	hauki	4	4020	1005	0,35	0,52	0,69	
Kyyvesi, Pilkanselkä Haukivuori	14.93	3.5.-7.5.83	hauki	4	3650	913	0,62	0,68	0,73	
Kyyvesi, Pohjalahti, Tiittaluoto, Haukivuori	14.93	25.4.-7.5.83	hauki	3	2650	883	0,45	0,50	0,53	
Iso-Rummukka, Jäppilä	04.25	3.5.-22.5.84	hauki	3	3070	1023	0,74	0,87	1,0	
Tinakypärä, Jäppilä	04.25	2.5.-27.5.84	hauki	3	3130	1043	1,0	1,4	1,9	
Iso-Rummukka, Jäppilä	04.25	elokuu 1984	rapu					0,38		
Pieni-Rummukka, Jäppilä	04.25	elokuu 1984	rapu					0,31		
Koski, Jäppilä	04.25	elokuu 1984	rapu					0,71		
Vuokala järvi, Heinävesi	04	5.4.-5.5.84	hauki	2	3170	1585	0,36	0,38	0,40	
Kinkolahti, Heinävesi	04.22	6.5.-20.5.84	hauki	2	2530	1265	0,38	0,42	0,45	
Tuliselkä, Heinävesi		11.3.84	hauki	2	1650	825	0,36	0,37	0,38	
Kukkarojärvi, Pieksämäki	14.79	toukok. 1985	hauki	3		850-1250	0,27	0,42	0,53	

